

AperTO - Archivio Istituzionale Open Access dell'Università di Torino

ANDAMENTI DI ALCUNI INQUINANTI ATMOSFERICI A TORINO NEI PERIODI FREDDI DAL 2004 AL 2006

This is the author's manuscript

Original Citation:

Availability:

This version is available <http://hdl.handle.net/2318/95736> since

Terms of use:

Open Access

Anyone can freely access the full text of works made available as "Open Access". Works made available under a Creative Commons license can be used according to the terms and conditions of said license. Use of all other works requires consent of the right holder (author or publisher) if not exempted from copyright protection by the applicable law.

(Article begins on next page)

**ANDAMENTI DI ALCUNI INQUINANTI ATMOSFERICI A TORINO NEI
PERIODI FREDDI DAL 2004 AL 2006**

CLAUDIO CASSARDO, NAIMA VELA, GIORGIO MANA

Dipartimento di Fisica Generale “Amedeo Avogadro”, Università di Torino

Riassunto. In questo lavoro sono stati analizzati alcuni dati meteorologici e chimici relativi alla città di Torino nei periodi freddi da ottobre ad aprile dell'anno successivo tra il 2004 ed il 2006, che comprendono quindi anche i Giochi Olimpici Invernali svoltisi nel febbraio 2006. I parametri chimici analizzati sono stati le polveri sottili, PM10, ed il biossido d'azoto, NO₂. Lo scopo dello studio è quello di valutare il livello di inquinamento dell'aria in una grande città nel periodo invernale, e di analizzare gli effetti dei provvedimenti di restrizione parziale o totale del traffico veicolare (domeniche ecologiche o giorni di targhe alterne) adottati in tali anni. L'analisi evidenzia chiaramente come, a Torino, nei periodi esaminati, i limiti di concentrazione degli inquinanti analizzati siano stati ampiamente e abitualmente superati nella pratica, soprattutto nei mesi invernali e, in particolare, per quanto riguarda il particolato sottile PM10. Oltre a confermare la forte dipendenza della concentrazione degli inquinanti presi in considerazione dalle condizioni atmosferiche (in particolare, vento, pioggia e diminuzione del gradiente della temperatura potenziale causano una netta diminuzione della concentrazione), lo studio ha mostrato come la diminuzione delle concentrazioni causata dalle piogge risulti più duratura nel tempo rispetto all'effetto della ventilazione; questo non sorprende, dato che Torino, a causa della sua sistemazione orografica, è una delle località nel mondo con la più bassa ventilazione, specialmente d'inverno. Le concentrazioni degli inquinanti in atmosfera, inoltre, come ci si aspettava, non sono risultate influenzate in alcun modo dai provvedimenti di limitazione del traffico, confermando che, per avere miglioramenti sostanziali della qualità dell'aria che garantiscano benefici di lungo periodo sulla salute, servono misure più strutturali in modo da abbattere le emissioni su tempi lunghi. Infine, l'analisi delle concentrazioni durante il periodo dei Giochi Olimpici Invernali del febbraio 2006 ha mostrato come tale periodo sia stato caratterizzato da valori particolarmente alti, sia a livello di valore medio mensile sia di valori medi giornalieri.

Abstract. In this work some meteorological and chemical data related to Turin during the cold periods from October to April of the following year between the 2004 and the 2006, which also include the Olympic Winter Games held in February 2006, were analyzed. The chemical parameters analyzed were the fine particulate – PM10 – and the nitrogen dioxide, NO₂. The purpose of the study is to assess the level of air pollution in a big city during the winter period, and analyze the effects of the actions to partially or totally restrict the vehicular traffic (ecological Sundays or days of alternating numberplates) adopted in these years. The analysis shows clearly how, in Turin, during the periods examined, the limits

of concentration of pollutants studied have been widely and routinely exceeded in practice, especially during the winter months, and with particular regard to the PM10. Besides confirming the strong dependence of the concentration of pollutants taken into consideration from the atmospheric conditions (in particular, wind, rainfall and a decrease of the potential temperature gradient cause a sharp decrease in the concentration), this study has shown that the reductions of the concentrations caused by rainfalls have a larger duration when compared with those caused by the wind. This fact is not surprising as Torino, due to its orographic location, is one of the locations in the world with the lowest wind speed, especially during winter. In addition, as expected, the concentrations of pollutants into the atmosphere were not influenced in any way by the restriction of traffic, confirming that, to obtain substantial improvements in air quality in order to ensure long-term health benefits, more structural measures are needed in order to reduce emissions for long time. Finally, the analysis of the concentrations during the Olympic Winter Games of February 2006 have shown that this period has been characterized by particularly high values, both in terms of monthly averages and of daily averages.

Introduzione

L'inquinamento atmosferico è un problema che affligge l'umanità sin dalla scoperta del fuoco (vedi, ad esempio, Mighall et al., 2002); tuttavia è soltanto dopo la Rivoluzione Industriale che ha cominciato ad influenzare concretamente la qualità della vita umana, a causa dell'aumento delle emissioni ed anche dell'espansione degli agglomerati urbani. Nel secolo scorso, condizioni eccezionali di inquinamento atmosferico hanno provocato marcati aumenti della mortalità, evidenti nel giro di uno o pochi giorni, ben documentati negli episodi nella Valle della Mosa (1930), a Donora (1948), e soprattutto nel caso di Londra (1952), in cui le condizioni avverse perdurarono circa una settimana causando oltre 4000 vittime.

Fino a una cinquantina di anni fa si riteneva che le concentrazioni di inquinanti raggiunte nelle città dei Paesi economicamente più avanzati fossero prive di rischio. Tuttavia, ulteriori studi fecero progressivamente emergere che il problema dell'inquinamento era in realtà globale e che per di più non era possibile determinare una soglia di inquinamento al di sotto della quale non fosse misurabile un eccesso di mortalità (Schwartz, 1994).

Soltanto in epoca molto recente, sono stati eseguiti degli studi sulla qualità dell'aria e si sono conseguentemente installate delle reti osservative di monitoraggio dei principali inquinanti; tuttavia, le serie di osservazioni disponibili sono comunque frammentarie e non più lunghe di 1-2 decenni, con rarissime eccezioni. Ad esempio, nel 1992 fu presentato il progetto del primo studio europeo APHEA (Air Pollution and Health, an European Approach), coinvolgente 15 città europee, molto diverse tra loro ma impegnate ad utilizzare lo stesso approccio metodologico, il cui scopo era quello di permettere l'analisi congiunta dei risultati (Katsouyanni et al. 1995).

L'espansione delle reti osservative, del resto, ha proceduto di pari passo con il lancio di numerosi progetti scientifici sull'argomento e con le pubblicazioni scientifiche di un numero sempre maggiore di articoli relativi agli effetti dell'inquinamento sulla salute pubblica. Recentemente è stato lanciato il progetto APHEA II (Bigotti, 1999), che ha coinvolto altre città europee oltre alle 15 della prima esperienza, e tra queste anche Torino, ed i cui risultati riferiti a Torino per il periodo 1991-1996 sono riportati da

Cadum et al (1999). Inoltre Torino è stata inclusa nello studio MISA (Biggeri et al., 2001), che ha coinvolto anche le città di Milano, Verona, Ravenna, Bologna, Firenze, Roma, Palermo.

L'analisi dei dati relativi a tali studi, limitati al 1998, mostrano che, nel corso degli anni '80 e '90 del 1900, si è verificata una tendenza generale alla diminuzione dei livelli di inquinamento e una variazione nella miscela di inquinanti presenti nell'atmosfera di molte città, con una accresciuta importanza relativa di quelli di tipo fotochimico e di origine autoveicolare, tendenza che ha coinvolto anche Torino, dove tutti gli inquinanti, ad eccezione dell'ozono e del biossido di azoto, hanno presentato un andamento decrescente nel tempo. Per il biossido di zolfo, ad esempio, il massimo annuo delle concentrazioni medie giornaliere è passato da 2000 μgm^{-3} (primi anni '70) a 200 μgm^{-3} (nel 1991), a circa 70 μgm^{-3} (nel 1996).

Nell'ultimo decennio, alcune amministrazioni comunali, provinciali e regionali, stimolate dalla legislazione europea, hanno stabilito delle soglie massime per la concentrazione di alcuni inquinanti dannosi per la salute umana, promulgando talora alcuni provvedimenti di restrizione (in particolare del traffico veicolare, e talvolta di limitazione del riscaldamento) a breve termine da adottare in caso di superamento di tali soglie, ed a medio termine al fine di evitare accumuli troppo elevati di inquinanti. Al momento, tuttavia, sia le soglie sia gli inquinanti così come, *a fortiori*, i provvedimenti adottati sono molto variabili da luogo a luogo, almeno sul territorio italiano, e la loro efficacia non è totalmente riconosciuta. Anzi, al riguardo si possono citare alcune conclusioni emerse dal convegno "ARIA PULITA" svoltosi nel mese di ottobre 2002 a Torino¹: *"Misure volte alla soppressione di questa o quella fonte di emissione per brevi periodi in corrispondenza di picchi di inquinamento non riducono i suoi livelli medi ed hanno influenza limitata anche su quelli a breve termine: questi ultimi dipendono più fortemente dalle condizioni climatiche locali che dall'attività delle fonti di emissione. Ciò deriva dal fatto che non solo i fenomeni di trasporto degli inquinanti, ma anche i meccanismi di trasformazione degli inquinanti primari e quelli di deposito ed eliminazione sono complessi e richiedono tempo".* Inoltre, *"non sarebbe logico attendersi che simili misure siano efficaci per la riduzione degli effetti sulla salute dell'inquinamento atmosferico. Gli effetti a lungo termine sono di gran lunga i più importanti e dipendono esclusivamente dai livelli di esposizione medi su lunghi periodi. Miglioramenti sostanziali della qualità dell'aria, con benefici di lungo periodo sulla salute, possono conseguire in compenso ad interventi strutturali."*

Del resto, è anche vero che, fisicamente, il livello di inquinamento in un dato luogo dipende dal rateo di diluizione dell'inquinante, il quale a sua volta dipende dalle condizioni meteorologiche (a breve termine) e climatiche (a lungo termine) del sito. In particolare, i fattori meteo-climatici che più influenzano l'inquinamento sono l'intensità del vento, la pioggia e la stabilità atmosferica.

Questo lavoro si propone di analizzare gli andamenti di alcuni inquinanti (specificamente, polveri sottili PM10 e biossido d'azoto NO₂) nel periodo tra i mesi di ottobre e aprile dell'anno successivo nel periodo 2004-2006 nell'area urbana di Torino, di valutare l'efficacia dei provvedimenti di restrizione del traffico messi in atto dal comune di Torino (targhe alterne e domeniche ecologiche), e gli effetti dell'incremento del traffico durante il periodo delle Olimpiadi Invernali del febbraio 2006.

¹ Aria Pulita (2002) Sito web <http://www.comune.torino.it/ambiente/ariapulita/atti-convegno.html>, ultimo aggiornamento 03.09.2007 13:22, visitato l'ultima volta il 07.08.2008 14:39

1. Gli inquinanti

Le concentrazioni degli inquinanti più comuni sono espresse usualmente in ppmv (parti per milione in volume) oppure in μgm^{-3} (massa di inquinante per unità di volume d'aria, cioè una densità). Qui di seguito sono elencati gli inquinanti più comuni e le loro caratteristiche.

Innanzitutto si definisce come sostanza inquinante una qualsiasi sostanza immessa direttamente o indirettamente dall'uomo nell'aria ambiente che può avere effetti dannosi sulla salute umana o sull'ambiente nel suo complesso (art. 2 del Dlgs n. 351/99). Attenendosi a questa definizione è utile individuare gli inquinanti con cui si ha a che fare in atmosfera; i più rilevanti sono: monossidi di carbonio (CO), biossido di zolfo (SO_2), ozono (O_3), ossidi di azoto (NO_x), benzene (C_6H_6), particolato e polveri sottili (PM10 e minori). In questo studio, l'analisi è stata incentrata sul biossido d'azoto (NO_2) e sul particolato sottile (in particolare, sul PM10).

Il PM10 (la sigla sta ad indicare il diametro delle polveri, inferiore a 10 μm) è generato, oltre che per cause naturali (tra le quali: spray marino, erosione del suolo, attività vulcanica), anche per effetto di attività antropiche, come lavorazioni industriali, usura dell'asfalto, degli pneumatici dei mezzi di trasporto, dei freni, della frizione e dalle emissioni in genere degli autoveicoli (le emissioni dei motori diesel partecipano in misura maggiore rispetto ai veicoli a benzina). Il particolato di origine antropica include tutta una serie di metalli (tra cui piombo, nichel, zinco, rame, ferro, magnesio, cadmio, amianto), così come anche spore fungine, pollini, pesticidi e fertilizzanti, che hanno pesanti impatti sulla salute pubblica in quanto, date le loro ridotte dimensioni, sono facilmente inalabili e possono penetrare nei polmoni, causando problemi come allergie, asma, bronchiti, enfisemi e, talora, tumori. La misura avviene facendo depositare l'aria su un apposito filtro, che viene quindi pesato oppure valutato tramite l'entità dell'attenuazione di radiazioni β che colpiscono il filtro stesso attraversando lo strato depositato. L'attuale normativa indica infatti come metodo di riferimento per la misura quello gravimetrico a pesata manuale. La rete di osservazioni del Comune di Torino, così come diverse altre stazioni di monitoraggio ambientale in Italia e nel mondo, ha installato invece degli strumenti di tipo TEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance), che possiedono un metodo di misura automatico diverso da quello manuale gravimetrico previsto dalla normativa. Secondo alcuni studi effettuati, gli analizzatori TEOM sottostimano il dato del PM10 soprattutto per le alte concentrazioni. Il problema è che il riscaldamento dell'aria in ingresso a 50 °C, effettuato per evitare la condensa dell'umidità sul filtro, genera artefatti negativi nella misura per l'evaporazione delle specie volatili come i sali di ammonio e molte specie organiche. La Relazione annuale sulla qualità dell'aria della regione Piemonte 2001, pubblicata nel bollettino regionale del 29 agosto 2002, ha stabilito di introdurre un fattore moltiplicativo correttivo pari a 1,3 (APEG Report, marzo 1999). Tale valore è stato scelto sulla base di un rapporto dei servizi di monitoraggio ambientale di Galles e Scozia (Moorcroft et al., 1999). I dati utilizzati in questo lavoro sono quelli orari acquisiti da uno strumento di tipo TEOM e successivamente corretti mediante l'applicazione di un fattore moltiplicativo pari a 1,3.

Il biossido di azoto si genera naturalmente in atmosfera per reazione chimica tra NO e O_2 , e NO è formato dall'azione dei batteri nel suolo. Inoltre, gli ossidi d'azoto

(NO, NO₂, N₂O, ed altri composti più complessi) sono generati in tutti i processi (anche di tipo industriale) di combustione per ossidazione, come, ad esempio, le emissioni presenti nei tubi di scarico dei mezzi di trasporto. All'incirca, metà del NO è prodotto dalle infrastrutture fisse (ciminiera) e metà dal traffico veicolare. NO₂ invece si forma da NO ed è un inquinante che causa danni gravi all'organismo, come irritazione delle mucose e diminuzione delle difese polmonari, può provocare anche complicazioni renali, ed è collegabile all'incidenza di bronchiti e polmoniti. A livello ambientale, le foschie con presenza di ossidi di azoto sono anche dannose per gli edifici ed i monumenti, e possono provocare la formazione di piogge acide (attraverso reazioni chimiche con l'acqua). NO₂ si misura tramite fenomeni di chemiluminescenza (dopo essere stato ridotto a monossido di azoto): infatti, l'intensità della radiazione luminosa emessa è proporzionale all'entità del deposito.

La concentrazione degli inquinanti nei bassi strati atmosferici (in cui si svolge la maggior parte dell'attività umana) è modulata naturalmente da fattori meteorologici. La diminuzione o l'aumento delle concentrazioni di inquinanti è da attribuirsi in primo luogo al grado di stabilità dell'atmosfera. La stabilità è a sua volta legata al valore della temperatura misurata a quote differenti tramite il profilo verticale della temperatura potenziale θ , definita come:

$$\vartheta = T \cdot \left(\frac{p_s}{p} \right)^{\frac{R}{c_p}} \quad (1)$$

dove T è la temperatura, p la pressione atmosferica [in hPa], $p_s = 1000$ hPa è la pressione di riferimento e $R/c_p = 0.286$; il grado di stabilità di uno strato atmosferico può essere valutato nel modo seguente:

$$\frac{\Delta \vartheta}{\Delta z} \begin{cases} < 0 & \text{instabile} \\ = 0 & \text{neutro} \\ > 0 & \text{stabile} \end{cases} \quad (2)$$

In caso di atmosfera instabile, l'inquinante tende a disperdersi a causa del rimescolamento turbolento, ridistribuendosi così nello strato rimescolato che può essere spesso anche più di un chilometro (specialmente d'estate), diminuendo così la concentrazione dell'inquinante al suolo. In condizioni di atmosfera stabile, non si ha rimescolamento, e la concentrazione resta pressoché costante in uno strato che talvolta si riduce a poche decine di metri d'altezza, o anche meno (specialmente di notte e, talora, d'inverno). Se l'atmosfera è stratificata neutralmente, si è in una situazione intermedia, quindi si ha un debole rimescolamento su uno strato non molto esteso verticalmente.

2. I dati

I dati meteorologici e chimici utilizzati per l'analisi sono i valori medi orari delle concentrazioni di PM10 (in $\mu\text{g m}^{-3}$, con un errore di misura pari a $1 \mu\text{g m}^{-3}$) e di biossido di azoto (in $\mu\text{g m}^{-3}$, con un errore di $1 \mu\text{g m}^{-3}$) ed i valori orari di velocità del vento (in m s^{-1} , con un errore di 0.1 m s^{-1}) e precipitazione (in mm, con un errore di 0.1 mm), misurati sul tetto dell'Ufficio d'Igiene in via della Consolata, in pieno centro di Torino, di temperatura (in $^{\circ}\text{C}$, con un errore di 0.1°C) e pressione (in hPa, con un errore di 1 hPa) forniti dalle stazioni meteorologiche dei Giardini Reali (in pieno centro cittadino, vicino al Palazzo Reale) e di Pino Torinese (sulla sommità di una nota collina torinese, nei pressi dell'Osservatorio Astronomico). L'ubicazione delle stazioni, che fanno parte della rete di ARPA Piemonte, è riportata in Fig. 1.

Tutti i dati sono riferiti ad un periodo di 14 mesi costituito dai due periodi freddi "ottobre 2004 – aprile 2005" e "ottobre 2005 – aprile 2006", comprensivo di 424 giorni complessivi, e che di qui in avanti verrà chiamato "*periodo di misura*".

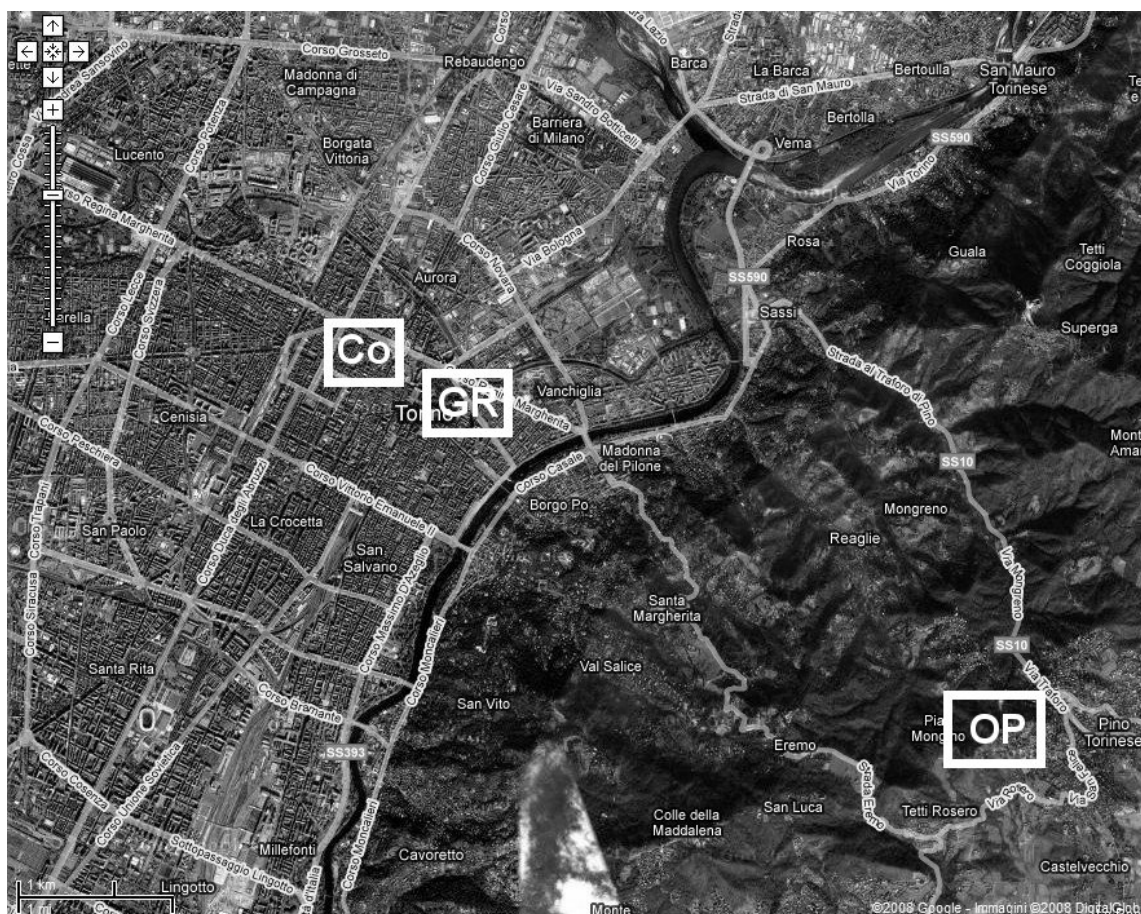


Figura 1. Mappa tratta da Google Maps™ che mostra la localizzazione delle stazioni utilizzate in questo studio: la stazione di via della Consolata (Co) e la stazione dei Giardini Reali (GR), ubicate al centro della città, e la stazione di Pino Torinese, presso l'Osservatorio Astronomico (OP), sulla collina.

3. L'importanza delle condizioni atmosferiche

Tenendo conto delle proprietà dell'atmosfera di cui si è parlato nell'introduzione, nella prima parte dello studio si è voluta verificare la presenza di una correlazione tra stabilità e concentrazione di particolato e biossido d'azoto, utilizzando i dati raccolti dalle centraline. In mancanza di una misura diretta del profilo verticale di temperatura (la stazione di radiosondaggio più vicina è l'aeroporto di Levaldigi, vicino a Cuneo, che però dista poco meno di 100 km e si trova a brevissima distanza dalle pendici delle montagne, risultando pertanto non idonea a ricostruire la stabilità dell'area urbana torinese), è stato deciso di utilizzare una metodologia già utilizzata in precedenza durante l'analisi di un caso di foehn (Natale et al., 1999) proprio al fine di ricostruire il profilo verticale di temperatura nell'area urbana di Torino. Tale metodologia si era già rivelata, nel caso citato, idonea a ricostruire il profilo di temperatura e, nei bassi strati, aveva utilizzato una stazione urbana di Torino posta a circa 240 m s.l.m. e quella di Pino Torinese, posta a circa 560 m di quota. Come illustrato in modo approfondito nel lavoro di Corradini et al. (2006), la scelta delle stazioni idonee alla ricostruzione del profilo verticale di temperatura va effettuata con cura al fine di evitare che una delle due stazioni possieda caratteristiche climatiche peculiari che possano ripercuotersi sui gradienti. Nel caso in esame, la mancanza di altre stazioni utili a dettagliare maggiormente il gradiente verticale pone un vincolo serio alla metodologia, ma lo studio da noi precedentemente effettuato ci permette di poter affermare che il metodo fornisce risultati attendibili con le due stazioni summenzionate. Pertanto, il gradiente di temperatura potenziale è stato da noi valutato usando le due stazioni di Pino Torinese e di Giardini Reali, orizzontalmente relativamente vicine e poste a 320 m di dislivello l'una dall'altra.

È stato poi considerato il gradiente medio relativo al periodo compreso tra le ore 12 e 15 locali, in modo da valutare la stabilità nelle ore più calde, in cui l'atmosfera è maggiormente instabile. Tale valore è stato confrontato con le concentrazioni medie di biossido d'azoto e di particolato relative allo stesso periodo. La scelta di effettuare la correlazione nel periodo più caldo della giornata è stata dettata dalla volontà di evidenziare maggiormente, nella correlazione, la presenza di instabilità, altrimenti probabilmente mascherata dalla stabilità dominante nelle ore più fredde, data la stagione più numerose. A questo proposito, vorremmo sottolineare come l'analisi dei dati acquisiti in un periodo precedente da un RASS posto nell'area urbana di Torino (precisamente, in Strada delle Cacce) e mai pubblicati ha evidenziato come, a Torino, si abbia una frequenza molto alta di inversioni termiche al suolo o a bassa quota, che d'inverno sfiora il 50% dei casi anche nelle ore più calde.

Nonostante la notevole dispersione dei dati, le figure 2 e 3 mostrano che, nei giorni con maggiore stabilità, le concentrazioni sono mediamente maggiori per entrambi gli inquinanti, mentre i valori di concentrazione più bassi si riscontrano, in prevalenza, quando il gradiente di temperatura potenziale è negativo, cioè quando c'è maggior rimescolamento. In entrambi i casi, i coefficienti di correlazione non sono molto elevati ($r=0.45$ per il PM₁₀ e $r=0.53$ per il NO₂) e le rette di regressione mostrate nelle figure non risultano statisticamente significative. Si può anche osservare la presenza sporadica di valori di concentrazione molto elevati in concomitanza di gradienti di temperatura potenziale quasi nulli: l'analisi ha evidenziato che tali casi corrispondono a giorni nei quali le condizioni meteorologiche sono variate durante la giornata.

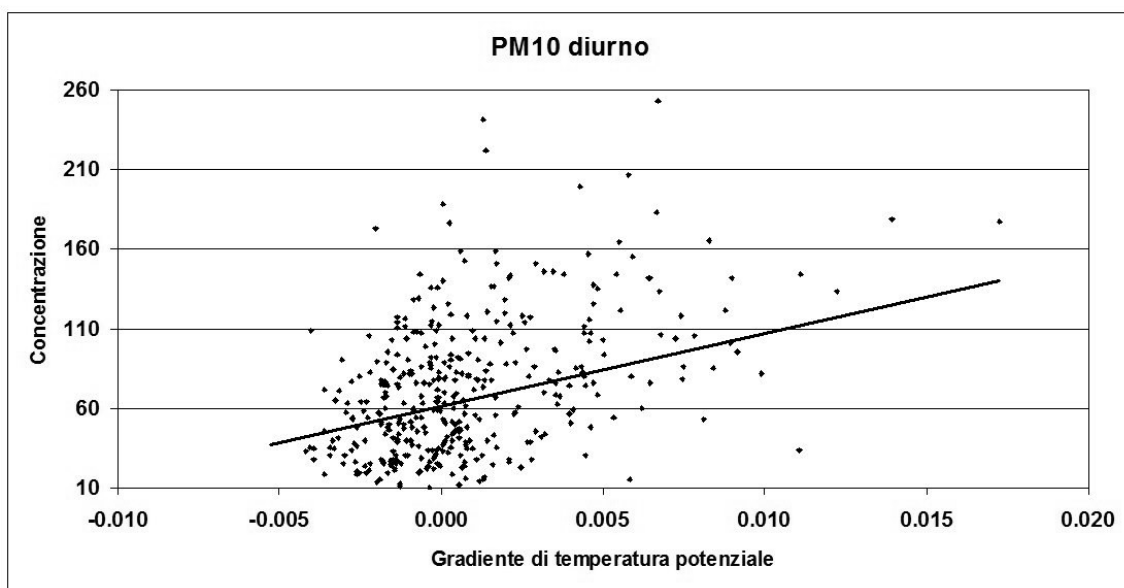


Figura 2. Correlazione tra il gradiente della temperatura potenziale (espresso in K m^{-1} , in ascissa e calcolato tra le stazioni di Torino Giardini Reali e Pino Torinese) e la concentrazione di PM10 (espressa in $\mu\text{g m}^{-3}$, in ordinata). Entrambi i valori sono medie calcolate tra le ore 12 e 15 locali. Il coefficiente di correlazione della retta di regressione è $r=0.45$, mentre la retta di regressione lineare, statisticamente non significativa, ha equazione $y = 6206 + 67.7 x$.

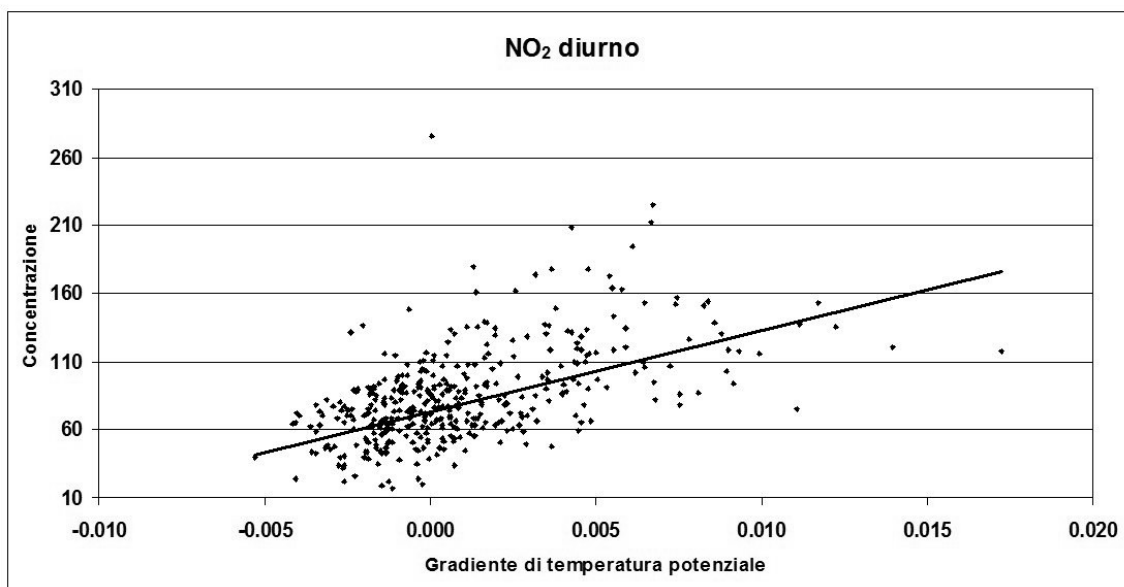


Figura 3. Come la Figura 2 ma per la concentrazione media giornaliera di NO_2 , sempre espressa in $\mu\text{g m}^{-3}$. In questo caso, il coefficiente di correlazione della retta di regressione è $r=0.53$, mentre la retta di regressione lineare, statisticamente non significativa, ha equazione $y = 5763 + 79.4 x$.

Un secondo importante aspetto verificato è stato lo studio degli andamenti delle concentrazioni degli inquinanti in corrispondenza del verificarsi di precipitazioni. In questo caso, si evidenzia con una certa chiarezza (si vedano le figure 4 e 5) che, nel momento in cui avviene una precipitazione (anche di piccola entità, vale a dire di 3-4 mm cumulate sulla giornata) sulle zone interessate dal rilevamento, si ha un'immediata evidente diminuzione nella concentrazione di inquinante (a causa del trasporto al suolo per il particolato, a causa di reazioni chimiche per il biossido di azoto, idrosolubile), specialmente per quanto riguarda il particolato. I valori di concentrazione rimangono poi bassi per alcuni giorni successivi all'evento.

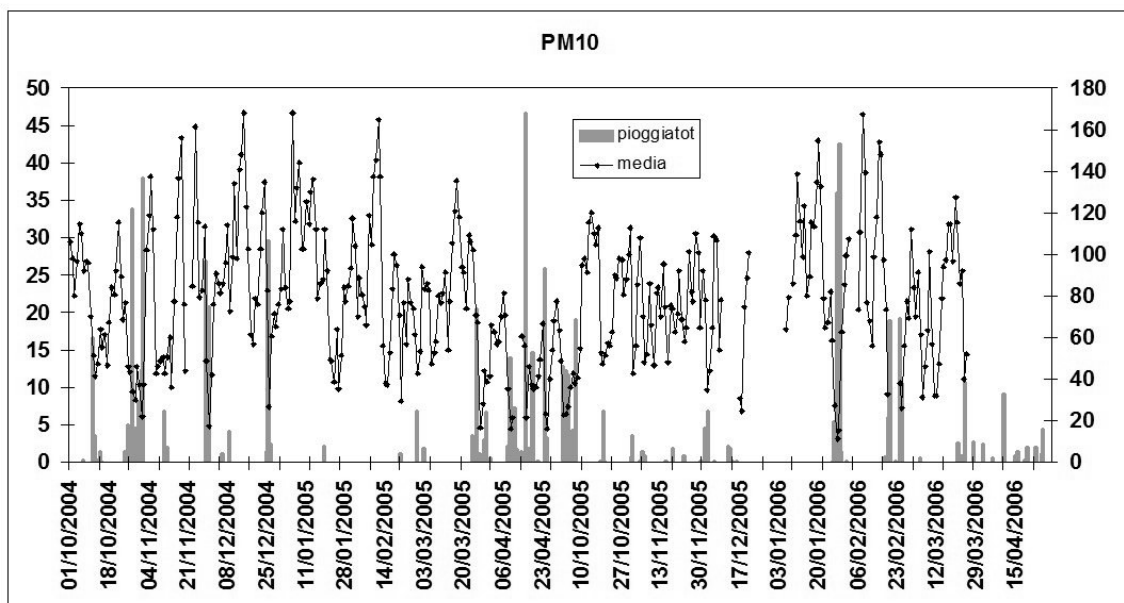


Figura 4. Valori medi giornalieri di concentrazione di PM10 ($\mu\text{g m}^{-3}$, scala a destra) e precipitazioni cumulate giornaliere (mm, scala a sinistra) nel periodo analizzato.

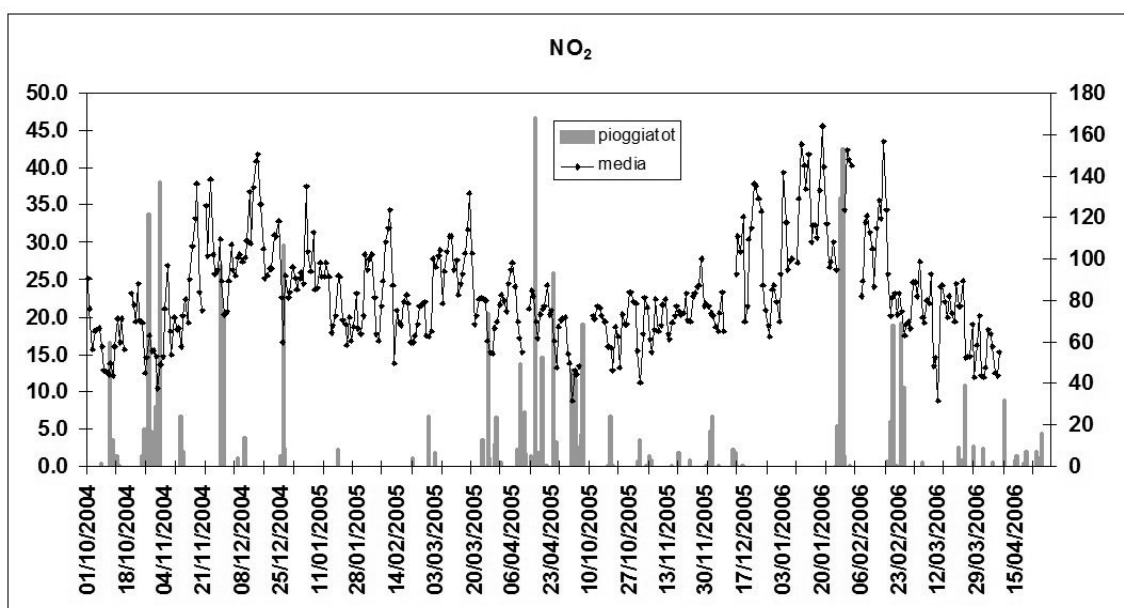


Figura 5. Valori medi giornalieri di concentrazione di NO₂ ($\mu\text{g m}^{-3}$, scala a destra) e precipitazioni cumulate giornaliere (mm, scala a sinistra) nel periodo analizzato.

Infine, un terzo aspetto analizzato come concausa naturale che porta ad una variazione della concentrazione di inquinanti in atmosfera è stato la presenza di venti intensi. Le analisi hanno evidenziato che, in presenza di venti di una certa entità (oltre 1.5 m s^{-1} di valore medio diurno), l'effetto di diluizione dell'aria è stato efficace ed immediato per entrambe le sostanze. Tuttavia, a differenza delle precipitazioni, la cui presenza provoca una diminuzione delle concentrazioni che tende a durare per svariati giorni dopo l'evento, per quanto riguarda il vento è possibile notare in diversi casi (si vedano le figure 6 e 7) come, a seguito di una giornata caratterizzata da vento intenso, spesso le concentrazioni degli inquinanti ritornino alte anche un solo giorno dopo l'episodio di vento intenso, soprattutto per quanto riguarda NO_2 .

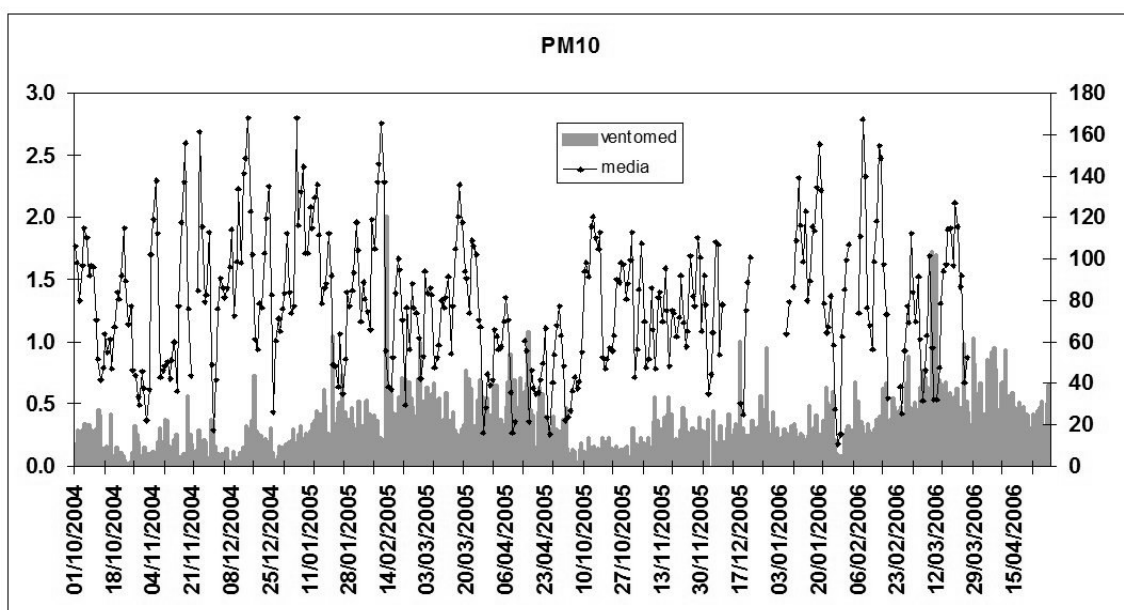


Figura 6. Valori medi giornalieri di concentrazione di PM_{10} ($\mu\text{g m}^{-3}$, scala a destra) e velocità media diurna (dalle 7:30 alle 19:00, ora locale) del vento (m s^{-1} , scala a sinistra) nel periodo analizzato.

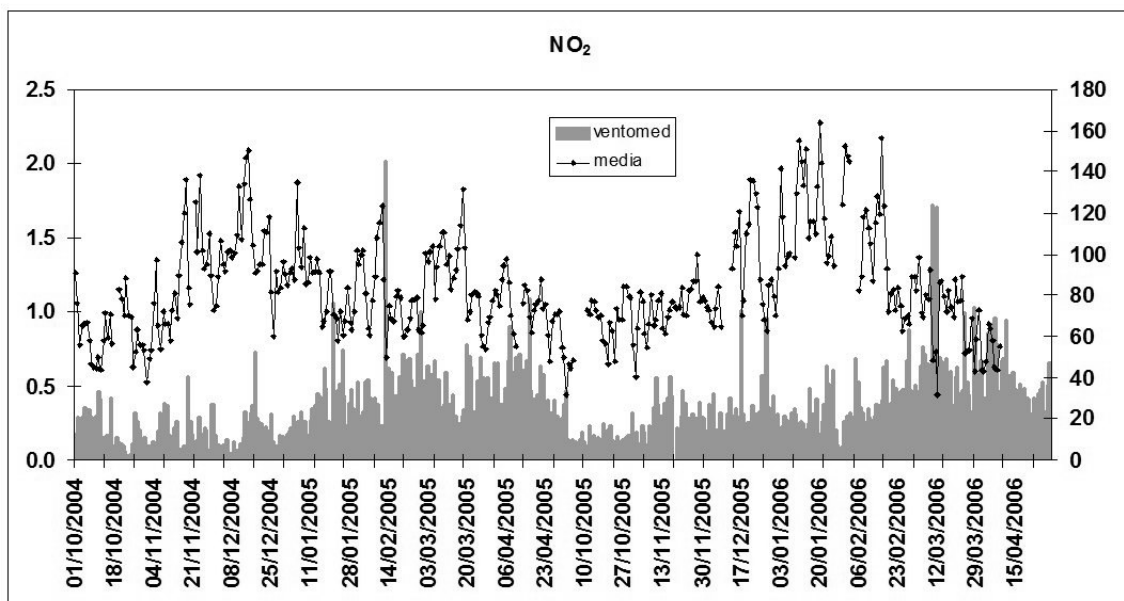


Figura 7. Valori medi giornalieri di concentrazione di NO_2 ($\mu\text{g m}^{-3}$, scala a destra) e velocità media diurna (dalle 7:30 alle 19:00, ora locale) del vento (m s^{-1} , scala a sinistra) nel periodo analizzato.

4. L'inquinamento a Torino nei periodi freddi 2004-06

Sul periodo di misura considerato (§2) è stata eseguita un'analisi delle concentrazioni medie giornaliere di PM10 e NO₂; i dati sono stati divisi in base al giorno della settimana, e sono riportati nelle Tabelle 1 e 2.

Per quanto riguarda il particolato sottile (figure 8, 9 e 10 e tabella 1), la soglia posta dalla legge come limite di sicurezza a livello di valore medio giornaliero è di 50 $\mu\text{g m}^{-3}$ mentre, a livello di valore medio annuo, è di 40 $\mu\text{g m}^{-3}$. Dall'analisi effettuata (tabella 1) risulta che la concentrazione media in ogni giorno della settimana è, in media, superiore al limite di legge; il giorno con la minore concentrazione è la domenica, con $58 \pm 3 \mu\text{g m}^{-3}$, mentre quelli con la concentrazione maggiore sono il mercoledì ed il giovedì, con $85 \pm 5 \mu\text{g m}^{-3}$. Il limite giornaliero di legge (50 $\mu\text{g m}^{-3}$) è stato superato ben 319 volte nel periodo (oltre il 75% dei casi).

L'analisi è stata condotta, in seguito, anche per il biossido d'azoto (figure 8, 9 e 10 e tabella 2), la cui soglia posta dalla legge come limite di sicurezza a livello di valore medio giornaliero è 200 $\mu\text{g m}^{-3}$ mentre, a livello di valore medio annuo, è 40 $\mu\text{g m}^{-3}$. In questo caso, la soglia è stata superata 21 volte, pari al 5% dei casi. Il giorno della settimana in cui la concentrazione di inquinante risulta più elevata è il giovedì, con $90 \pm 3 \mu\text{g m}^{-3}$, mentre quello con la concentrazione minore è ancora la domenica, con $67 \pm 3 \mu\text{g m}^{-3}$. La figura 11 riporta l'andamento delle medie relative ai diversi giorni della settimana calcolato usando tutti i dati disponibili.

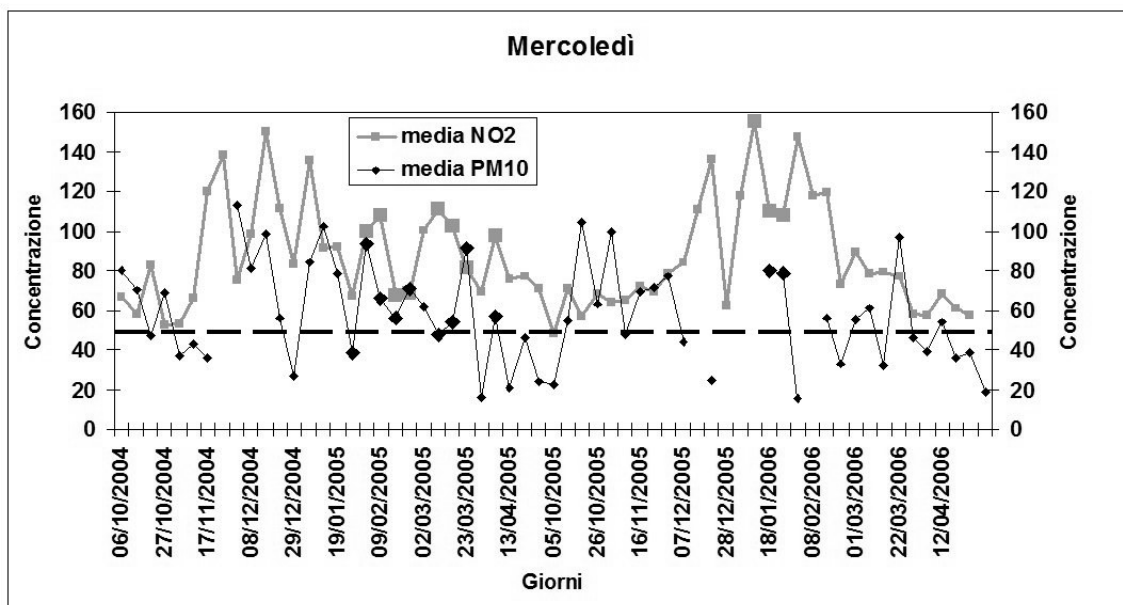


Figura 8. Valori medi giornalieri di PM10 e NO₂ ($\mu\text{g m}^{-3}$) registrati in tutti i mercoledì nel periodo analizzato. I dati relativi ai giorni con restrizioni del traffico sono evidenziati con un simbolo più grande. La linea nera tratteggiata rappresenta il limite di legge per la media giornaliera di PM10.

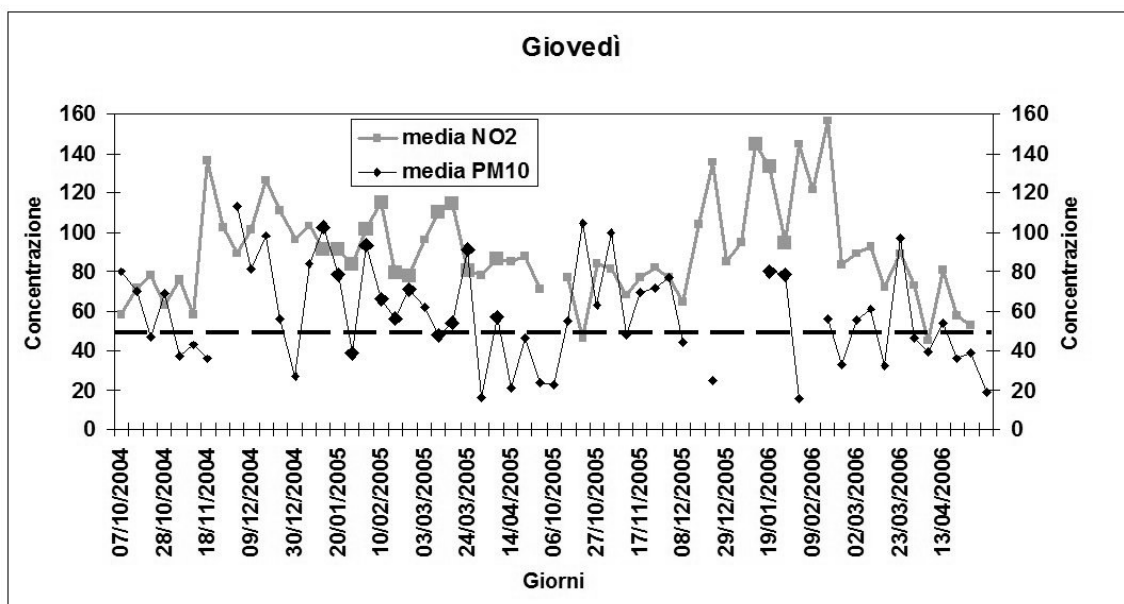


Figura 9. Valori medi giornalieri di PM10 e NO₂ ($\mu\text{g m}^{-3}$) registrati in tutti i giovedì nel periodo analizzato. I dati relativi ai giorni con restrizioni del traffico sono evidenziati con un simbolo più grande. La linea nera tratteggiata rappresenta il limite di legge per la media giornaliera di PM10.

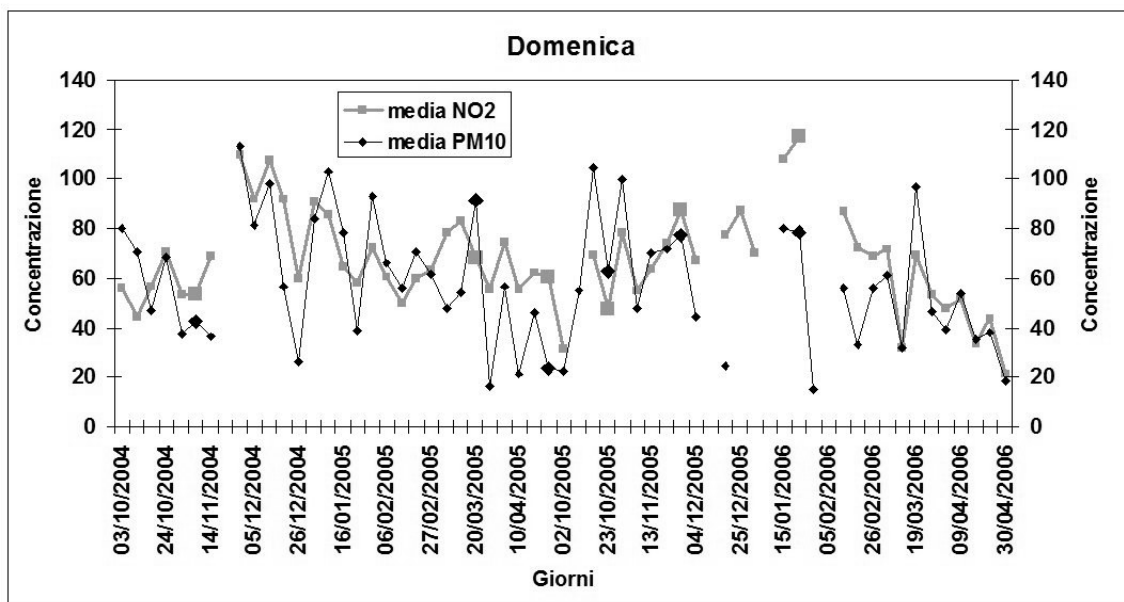


Figura 10. Valori medi giornalieri di PM10 e NO₂ ($\mu\text{g m}^{-3}$) registrati in tutte le domeniche nel periodo analizzato. I dati relativi ai giorni con restrizioni del traffico sono evidenziati con un simbolo più grande.

Statistiche PM10	Concentrazioni medie [$\mu\text{g m}^{-3}$]	Casi	Concentrazioni senza restrizioni [$\mu\text{g m}^{-3}$]	Casi	Concentrazioni con restrizioni [$\mu\text{g m}^{-3}$]	Casi
Lunedì	70 ± 4	54				
Martedì	74 ± 4	55				
Mercoledì	85 ± 5	55	83 ± 6	43	91 ± 9	12
Giovedì	85 ± 5	56	80 ± 5	42	101 ± 7	14
Venerdì	81 ± 4	56				
Sabato	73 ± 4	58				
Domenica	58 ± 3	55	57 ± 4	49	63 ± 10	6

Tabella 1. Medie, deviazioni standard della media e numero di casi per giorno della settimana relative alla concentrazione di PM10 calcolate su tutto il periodo considerato (seconda colonna), solo nei giorni senza restrizioni del traffico (quarta colonna) e soltanto nei giorni di restrizioni del traffico (sesta colonna).

Statistiche NO ₂	Concentrazioni medie [$\mu\text{g m}^{-3}$]	Casi	Concentrazioni senza restrizioni [$\mu\text{g m}^{-3}$]	Casi	Concentrazioni con restrizioni [$\mu\text{g m}^{-3}$]	Casi
Lunedì	79 ± 3	56				
Martedì	81 ± 4	58				
Mercoledì	87 ± 4	60	85 ± 4	48	98 ± 7	12
Giovedì	90 ± 3	59	87 ± 4	45	100 ± 6	14
Venerdì	86 ± 3	56				
Sabato	79 ± 3	58				
Domenica	67 ± 3	55	67 ± 3	49	72 ± 11	6

Tabella 2. Medie, deviazioni standard della media e numero di casi per giorno della settimana relative alla concentrazione di NO₂ calcolate su tutto il periodo considerato (seconda colonna), solo nei giorni senza restrizioni del traffico (quarta colonna) e soltanto nei giorni di restrizioni del traffico (sesta colonna).

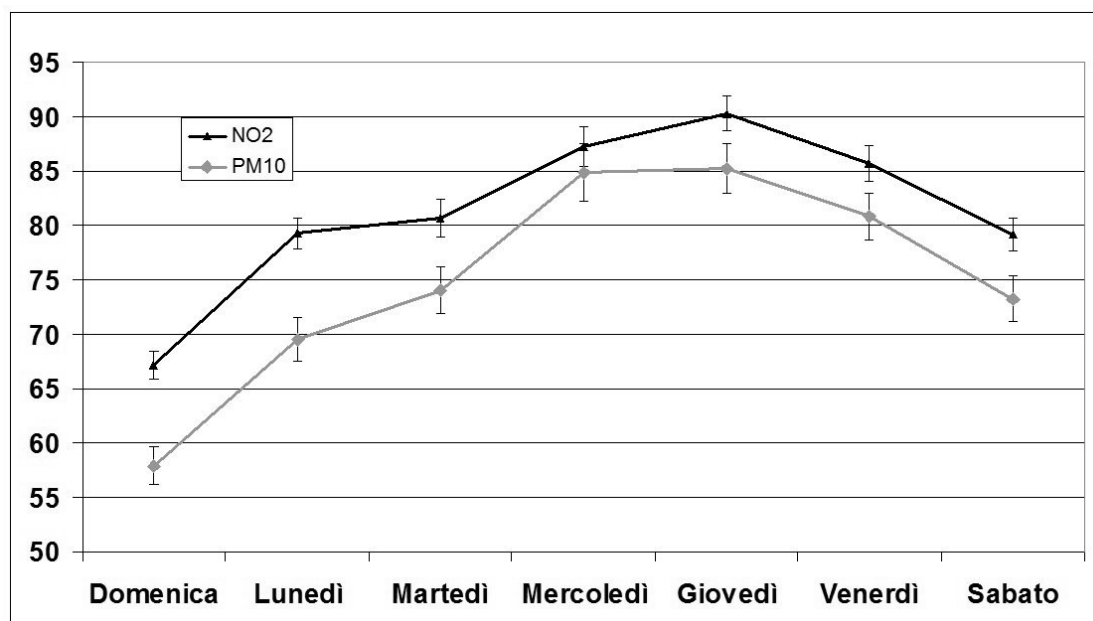


Figura 11. Valori medi di PM10 e NO₂ ($\mu\text{g m}^{-3}$) su tutto il periodo registrati nei diversi giorni della settimana. Le barre verticali rappresentano la deviazione standard.

5. L'influenza delle restrizioni del traffico

Nel periodo di misura considerato (§2) il comune di Torino ha adottato per 32 volte dei provvedimenti di restrizione totale e parziale del traffico. In alcune giornate feriali del mercoledì (12 casi) e del giovedì (14 casi) è stata imposta la circolazione nell'intero territorio comunale a targhe alterne (TA) per tutti i veicoli a benzina sprovvisti di marmitta catalitica e per tutti i veicoli diesel Euro 0 o Euro 1, mentre in alcune giornate domenicali (6 casi, chiamati domeniche ecologiche, DE) il traffico veicolare è stato bloccato completamente in una porzione di città (il centro storico, cioè un'area delimitata dai corsi Vittorio Emanuele II, Inghilterra, Principe Eugenio, Regina Margherita – fino al ponte Regina Margherita - corso Casale – fino al ponte Umberto I) o, in un unico caso (domenica 22 gennaio 2006), nell'intero territorio cittadino. Pertanto, vi sono stati 392 giorni senza alcuna restrizione. Compreso in questo intervallo c'è anche il periodo olimpico, che sarà analizzato più approfonditamente in seguito. I giorni TA e DE sono stati evidenziati con un simbolo di dimensioni maggiori nelle figure 8, 9 e 10.

I giorni in cui erano presenti restrizioni del traffico (TA o DE) hanno paradossalmente fatto registrare valori di inquinamento maggiori rispetto alle rispettive medie, come si può vedere dal sommario statistico nelle tabelle 1 e 2 e nelle figure 12 e 13, e la differenza tra i valori medi registrati nei giorni con e senza restrizioni è statisticamente significativa per quanto riguarda il mercoledì (per il solo NO₂) ed il giovedì (per entrambi gli inquinanti). Tale risultato ha probabilmente diverse motivazioni. Di sicuro, un fattore importante è che i provvedimenti di restrizione sono stati adottati in giorni fissi (TA il mercoledì ed il giovedì, DE la domenica), indipendentemente dalle condizioni atmosferiche, ed hanno avuto la durata di un solo giorno (DE), oppure di due giorni con restrizioni parziali (TA). Pertanto, non sono stati sufficienti a consentire un adeguato rimescolamento o una sufficiente diluizione dell'inquinamento già presente. Inoltre, in molti casi (TA) sono stati provvedimenti parziali che, di fatto, hanno prodotto una diminuzione del traffico inferiore al 50%. Un'altra concausa potrebbe anche essere la maggiore frequenza dei passaggi dei mezzi pubblici (purtroppo in buona parte non ancora di alto standard ecologico) per il trasporto dei cittadini verso il centro.

In definitiva, quest'analisi dimostra che, pur riconoscendo il valore educativo ed informativo di tali provvedimenti, la loro efficacia strategica per la riduzione dell'inquinamento è pressoché nulla.

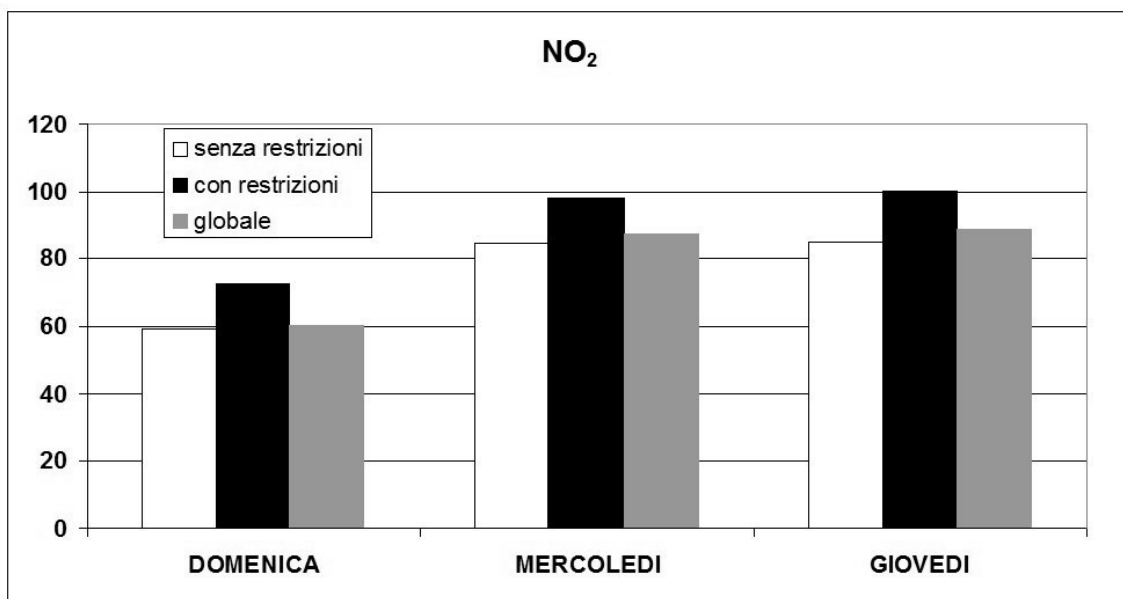


Figura 12. Valori medi di concentrazione di NO₂ (µg m⁻³) relativi ai giorni domenica, mercoledì e giovedì nel periodo analizzato, suddivisi in funzione dei provvedimenti di restrizione del traffico.

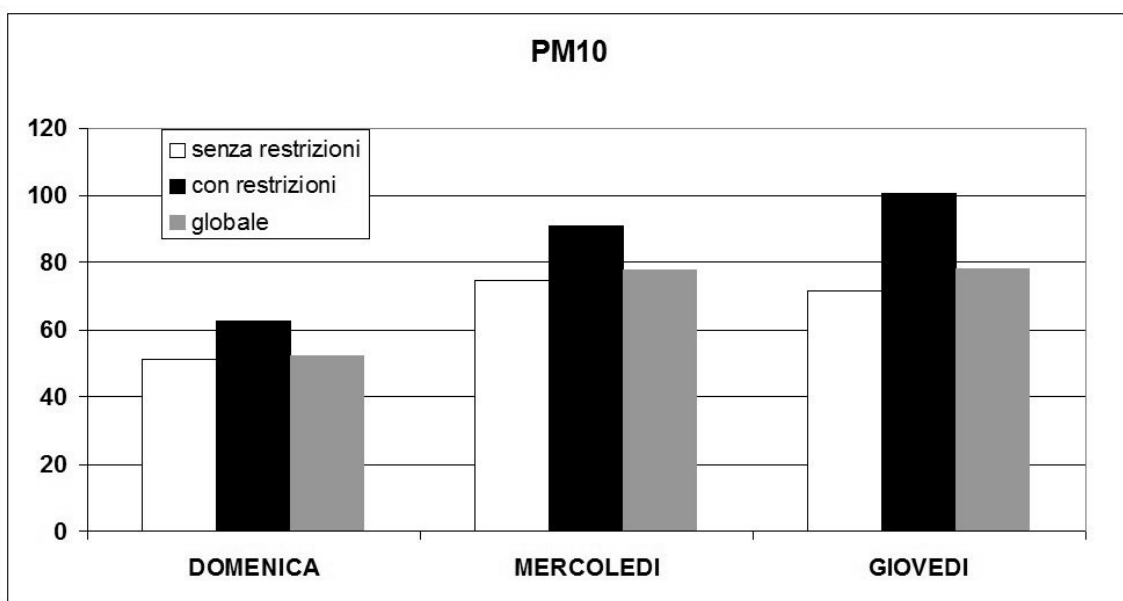


Figura 13. Valori medi di concentrazione di PM₁₀ (µg m⁻³) relativi ai giorni domenica, mercoledì e giovedì nel periodo analizzato, suddivisi in funzione dei provvedimenti di restrizione del traffico.

6. L'inquinamento durante le Olimpiadi invernali del 2006

Uno studio approfondito è stato condotto sul periodo delle Olimpiadi invernali svoltesi a Torino nel febbraio 2006.

In primo luogo, le medie mensili dei due inquinanti relative ai due periodi freddi ottobre-aprile del 2004-2005 e 2005-2006 sono state confrontate tra loro. Si può notare, nella figura 14, che le due serie relative al particolato presentano valori ed andamenti molto simili tra loro in tutti i mesi, con una leggera sovrastima (circa $5 \mu\text{g m}^{-3}$) dei dati del 2004-2005, con l'unica eccezione del mese di febbraio 2006, in cui la concentrazione di particolato è nettamente maggiore nel 2006. Per quanto riguarda, invece, i dati di biossido d'azoto, le concentrazioni a gennaio e febbraio 2006 risultano molto superiori agli stessi mesi dell'anno precedente, mentre negli altri mesi le differenze sono dell'ordine di circa $10 \mu\text{g m}^{-3}$ sistematicamente a favore dei mesi freddi del periodo 2004-2005. La figura 15 riporta le statistiche mensili di alcuni parametri meteorologici relativi ai 3 anni 2004-2006: nel periodo gennaio-febbraio 2006, vi sono stati 6 giorni di pioggia per complessivi 119 mm, da confrontarsi con i 2 giorni piovosi per un totale di 6 mm nel 2005. Effettivamente, nel 2006 è piovuto di più, ma in definitiva 4 giorni di pioggia intensa su un totale di 59 giorni non sono un numero tale da costituire una differenza significativa, tanto più che la velocità del vento è invece stata inferiore nel 2006 rispetto al 2005. Pertanto, l'analisi meteorologica non evidenzia differenze significative al di là delle consuete fluttuazioni interannuali, per cui la differenza riscontrata è sostanzialmente da imputarsi al diverso rateo di emissioni avvenuto nei due periodi. A tale proposito, si rileva come, sin dall'inizio del mese di gennaio 2006, numerosissimi convogli di sportivi, giornalisti ed appassionati legati all'organizzazione dell'evento olimpico si siano riversati in città, congestionando notevolmente il traffico. Ricordiamo anche, a tal proposito, che l'amministrazione comunale aveva intensificato enormemente i passaggi dei mezzi pubblici, spesso gratuiti, ed aveva istituito corsie preferenziali riservate per il passaggio degli automezzi coinvolti nell'organizzazione dell'evento; questo ha probabilmente comportato una lieve diminuzione ma un conseguente aumento di caoticità del traffico veicolare cittadino, a scapito di un forte aumento di quello legato all'evento olimpico ed al transito molto più frequente e capillare dei mezzi pubblici. Questa combinazione di fattori ha causato valori insolitamente alti di biossido di azoto più che non di particolato. Il valore di concentrazione di particolato leggermente superiore registrato a febbraio 2006 rispetto a quello del mese precedente può essere spiegato guardando i giorni di pioggia, doppi a gennaio, che tuttavia non hanno influito sostanzialmente sulla concentrazione di biossido d'azoto. Pertanto, i due eventi di moderata precipitazione a febbraio (le piogge di fine mese e, soprattutto, la pittoresca nevicata di metà febbraio), pur riducendo in parte la concentrazione degli inquinanti, non sono risultati significativi.

Si notano inoltre, per quanto concerne il NO_2 , dei picchi di concentrazione giornaliera mai rilevati nel resto dell'intero periodo analizzato: in particolare, il 16 febbraio 2006 sono stati superati $320 \mu\text{g m}^{-3}$ e, nel periodo gennaio-febbraio 2006, in 3 casi (su 53 giorni con misure) è stata superata la media giornaliera di $200 \mu\text{g m}^{-3}$, che rappresenta anche il limite di legge. Per quanto riguarda, invece, il PM_{10} , la soglia di $200 \mu\text{g m}^{-3}$ è stata superata 7 volte nel bimestre gennaio-febbraio 2006, con un valore massimo di oltre $275 \mu\text{g m}^{-3}$ registrato il 12 gennaio, tuttavia inferiore rispetto al valore di $372 \mu\text{g m}^{-3}$ registrato il giorno 11 febbraio 2005. Il limite di legge di $50 \mu\text{g m}^{-3}$ come

valore medio diurno per il particolato è stato superato in 11 giorni su 44 giorni in cui sono state effettuate le misure nel bimestre gennaio-febbraio 2006.

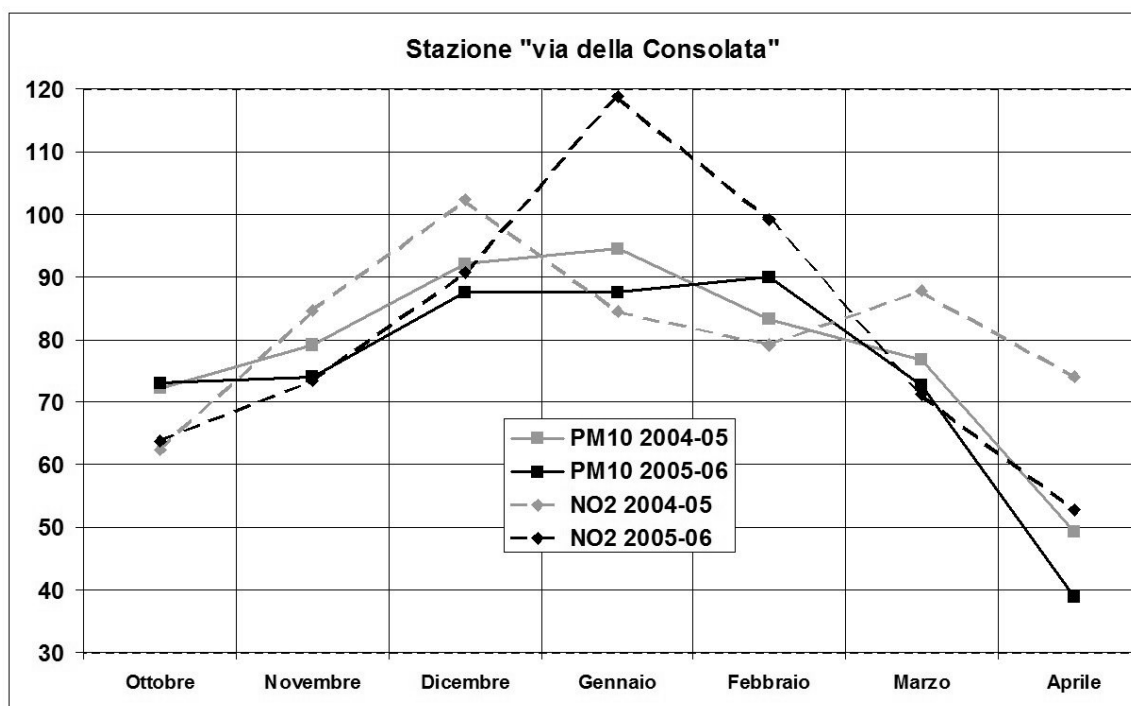


Figura 14. Valori medi mensili di concentrazione di PM10 e NO₂ (µg m⁻³) nei mesi dei due periodi freddi (ottobre - aprile) 2004-2005 e 2005-2006.

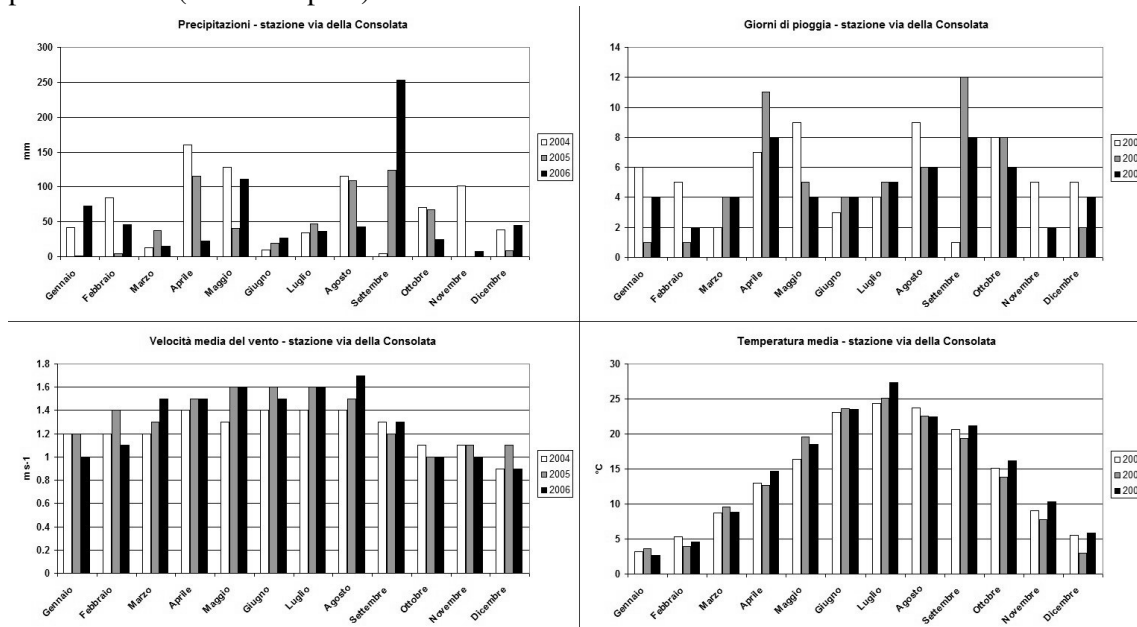


Figura 15. Valori medi mensili dei valori di precipitazione (in alto a sinistra, in mm), dei giorni di pioggia (in alto a destra), della velocità media del vento (in basso a sinistra, in m s⁻¹) e di temperatura media (in basso a destra, in °C) relativi al periodo 2004-2006 ed alla stazione torinese di via della Consolata.

7. Le notti bianche olimpiche

L'ultima analisi di questo studio è stata dedicata alle notti bianche olimpiche. Si tratta di due notti tra sabato e domenica (18-19 e 25-26 febbraio 2005) in cui i negozi nel centro di Torino sono rimasti aperti fino all'alba successiva ed in cui sono state organizzate molte manifestazioni nel centro cittadino. In tali occasioni, il centro storico di Torino è rimasto chiuso alle automobili.

Nelle figure 13 e 14 è evidente il picco serale d'inquinamento (dovuto al traffico di rientro) presente in un sabato normale senza restrizioni (11 febbraio 2006), paragonato con le concentrazioni rilevate nei due sabati successivi (notti bianche). Si può notare come, in tali occasioni, il picco d'inquinamento dovuto al traffico serale di rientro sia nettamente inferiore (e addirittura assente nella notte del 25-26), a scapito di livelli di concentrazione leggermente superiori durante tutto l'arco del pomeriggio. Tale ridistribuzione è probabilmente da attribuirsi al fatto che i pendolari in rientro hanno scelto arterie alternative per non restare ingolfati nel traffico della festa, mentre gli autoveicoli di visitatori che normalmente non vengono nel centro di Torino il sabato vi si sono recati dal primo pomeriggio per partecipare all'evento.

8. Conclusioni

Da qualche mese a questa parte anche i mezzi di comunicazione di massa parlano abbastanza spesso (anche se non sempre a proposito) dell'evoluzione climatica del pianeta a medio o lungo termine. Al contrario, la problematica dell'inquinamento atmosferico, pur essendo un fenomeno che riguarda quotidianamente tutti ed è attuale, desta molta meno attenzione e preoccupazione nell'opinione pubblica.

È vero: l'inquinamento atmosferico è un fenomeno variabile, difficile da caratterizzare, ed il suo impatto sulla salute pubblica è altrettanto difficile da sviscerare con precisione. Tuttavia, da quanto emerge in una recente rassegna della letteratura (Pope, 2000), si osserva che l'inquinamento ha una forte influenza sulla mortalità giornaliera, colpendo *in primis* l'apparato respiratorio ma anche quello cardiovascolare, che presenta peraltro il rischio di decesso in assoluto più marcato. Kunzli et al. (2000) hanno stimato nel 4% la percentuale di mortalità attribuibile nel 1996 in Francia all'inquinamento, a livello medio nazionale (probabilmente tale valore potrebbe essere sensibilmente maggiore nelle zone ad alto livello di inquinamento, quali le aree urbane). Questo dimostra che un impatto sulla salute pubblica, in effetti, c'è.

Nello svolgimento dell'analisi si è chiaramente evidenziato come, a Torino, nei due periodi freddi esaminati (ottobre - aprile) relativi al biennio 2004 - 2006, i limiti di concentrazione degli inquinanti analizzati (polveri sottili e biossido d'azoto), fissati - si presume - a salvaguardia della salute dei cittadini, siano stati ampiamente e abitualmente superati nella pratica, soprattutto nei mesi invernali. In particolare, questo è vero soprattutto per quanto riguarda il particolato sottile PM10.

La concentrazione degli inquinanti presi in considerazione in questo lavoro mostra una forte dipendenza dalle condizioni atmosferiche. Vento, pioggia e diminuzione del gradiente della temperatura potenziale disperdono gli inquinanti e ne possono diminuire la concentrazione. Lo studio ha mostrato come la diminuzione delle concentrazioni causate da piogge risulti più duratura nel tempo, mentre la dispersione degli inquinanti

provocata dal vento forte ha di solito breve durata e spesso accade che un solo giorno dopo le concentrazioni assumano di nuovo valori simili a quelli precedenti i giorni di vento intenso.

L'analisi dei dati forniti non ha rilevato alcuna modificazione sensibile della concentrazione degli inquinanti in atmosfera in concomitanza con le domeniche ecologiche o con i giorni di targhe alterne; anzi, tali giorni mostrano addirittura valori di concentrazione degli inquinanti analizzati superiori rispetto a quelli misurati nei giorni normali, ed i risultati sono statisticamente significativi. Anche se il numero di casi analizzati non è elevato, questi risultati sembrano dunque confermare il fatto (già sottolineato nell'introduzione) che misure volte a ridurre le fonti di emissioni sul breve periodo hanno un'influenza estremamente limitata, per non dire pressoché nulla, e non hanno quindi efficacia per la riduzione degli effetti sulla salute dell'inquinamento atmosferico, anche perché i valori sul breve periodo, come si è visto, dipendono fortemente dalle condizioni meteorologiche (stabilità atmosferica e presenza di vento o precipitazioni). Per avere miglioramenti sostanziali della qualità dell'aria, con benefici di lungo periodo sulla salute, servono invece misure strutturali, atte ad abbattere le emissioni su periodi lunghi.

L'ultima parte del lavoro ha esaminato le concentrazioni degli inquinanti registrate durante il periodo delle Olimpiadi invernali di Torino 2006. Come prevedibile, soprattutto da parte di chi, abitando in città, ha potuto osservare l'enorme incremento di traffico in città dovuto a cittadini, turisti ed operatori, si è riscontrato un notevole incremento nella concentrazione degli inquinanti nel periodo olimpico. In particolare, il giorno 16 febbraio 2006 ha fatto registrare i valori massimi dell'intero periodo analizzato per quanto riguarda le concentrazioni di NO₂, e un buon 50% dei dieci valori orari più elevati registrati nel periodo di analisi si riferisce al periodo olimpico.

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare il settore inquinamento dell'ARPA Piemonte per la fornitura dei dati di concentrazione degli inquinanti via web attraverso il software Arianet, ed il settore meteorologico dello stesso Ente per la fornitura dei dati meteorologici. Gli autori desiderano altresì biasimare il governo italiano per la decisione di approvare la legge 133 nell'agosto 2008, fatto che renderà sempre più difficoltoso, se non impossibile, lo svolgimento di lavori di questo tipo, condotti senza un finanziamento specifico.

Bibliografia

- BIGGERI A., BELLINI P., TERRACINI B. (Eds), 2001: MISA, metanalisi italiana degli studi sugli effetti a breve termine dell'inquinamento atmosferico. *Epidemiol Prev*, **25(1)**, 1 – 72.
- CADUM E., ROSSI G., MIRABELLI D., VIGOTTI M.A., NATALE P., ALBANO L., MARCHI G., DI MEIO V., CRISTOFANI R., COSTA G., 1999: Inquinamento atmosferico e mortalità giornaliera a Torino, 1991-1996. *Epid Prev*, **23**, 268 - 276.
- CORRADINI C., MORBIDELLI R., SALTALIPPI C. E FLAMMINI A., 2006: Determinazione preliminare della stabilità atmosferica per la modellazione degli inquinanti nella bassa troposfera. *Boll. Geofis.*, **XXIX(1-4)**, 7 - 18.
- KATSOUYANNI K., TOULOUMI G., SAMOLI E., CRYPARIS A., LE TERTRE A., MONOPOLIS Y., ROSSI G., ZMIROU D., BALLESTER F., BOUMGHAR A., ANDERSON H.R., WOJTYNIAK B., PALDY A., BRAUNSTEIN R., PEKKANEN J., SCHINDLER C., SCHWARTZ J., 2001: Confounding and effect modification in the short-term effects of ambient particles on total mortality: results from 29 European cities within the APHEA-2 project. *Epidemiology*, **12**, 521 – 531.
- KUNZLI N., KAISER R., MEDINA S., STUDNICKA M., CHANEL O., FILLIGER P., HERRY M., HORAK F. JR, PUYBONNIEUX-TEXIER V., QUÉNEL P., SCHNEIDER J., SEETHALER R., VERGNAUD J-C., SOMMER H., 2000: Public-health impact of outdoor and traffic-related air pollution: a European assessment. *Lancet*, **356**, 795-801.
- MIGHALL T.M., ABRAHAMS P.W., GRATTAN J.P., HAYES D., TIMBERLAKE S., FORSYTH S., 2002: Geochemical evidence for atmospheric pollution derived from prehistoric copper mining at Copa Hill, Cwmystwyth, mid-Wales, UK. *Science of the Total Environment*, **292 (1/2)**, 69-80.
- MOORCROFT S., LAXEN D., STEDMAN J., VAWDA Y., CONLAN B. AND ABBOTT J., 1999: Assistance with the review and assessment of PM10 concentrations in relation to the proposed EU Stage 1 Limit Values, Department of the Environment, Transport and the Regions, the Welsh Office and the Scottish Office. Available in internet at the address:
<http://www.airquality.co.uk/archive/reports/empire/stanpm/stanpm.pdf> (last contact: Nov. 18, 2008)
- NATALE P., ANFOSSI D., CASSARDO C., 1999: Analysis of an anomalous case of high air pollution concentration in Turin after a Foehn event. *Int. J. Environment and Pollution*, **11**, 147-164
- POPE CA III., 2000: Epidemiology of fine particulate air pollution and human health : biologic mechanisms and who's at risk ? *Environ Health Perspect*, **108(S3)**, 713-723.
- SCHWARTZ J., 1994: Air pollution and daily mortality: a review and meta analysis. *Environ. Res.*, **64**, 36-52.
- VIGOTTI MA., 1999: Effetti a breve termine prodotti dalla esposizione ad inquinamento atmosferico urbano sulla salute umana in Europa. I progetti APHEA (Air Pollution Health: a European Approach). *Epid Prev*, **23**, 408 – 415.